

钢材强度对预应力撑杆钢柱承载能力影响研究^①

梁 策, 杨浴儿, 乔 克, 袁 军

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 在普通钢柱中引入撑杆和预应力索可以明显提升结构的承载性能. 运用有限元软件 ABAQUS, 对双层预应力撑杆柱进行了屈曲分析, 对比在不同撑杆长度和拉索直径下, 钢材强度对双层预应力撑杆柱稳定承载性能的影响. 研究表明: 结构的屈曲模态决定了钢材强度与结构承载性能之间的关系, 结构发生对称屈曲时, 提升钢材强度对结构稳定承载力并没有显著影响; 当结构发生反对称屈曲时, 钢材强度的提升使得结构承载性能明显增强.

关 键 词: 受压钢柱; 屈曲分析; 承载能力; 稳定性

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)04-0106-06

预应力撑杆钢柱是通过在细长受压钢柱中引入撑杆和预应力索, 来提高其稳定承载能力的钢结构构件. 对拉索施加预应力后, 撑杆会对中心柱形成侧向支撑, 从而减小中心柱的计算长度, 以提升其稳定性^[1]. 由于稳定性好、造型美观、用料节省, 预应力撑杆钢柱在国内外的工程实践中得到广泛地应用.

自上世纪 70 年代以来, 国内外学者对预应力撑杆钢柱展开了大量的研究. 文献[2]对预应力撑杆钢柱的屈曲荷载进行了研究, 分析表明, 预应力撑杆钢柱在仅沿柱高布置一层撑杆的情况下, 其屈曲荷载可以达到相应普通受压钢柱欧拉荷载的 7 倍以上. 文献[3]推导了单层预应力撑杆钢柱屈曲荷载和拉索初始预张力的关系. 文献[4]对沿柱高设置多层撑杆的预应力撑杆钢柱进行了研究, 其研究表明, 增加撑杆层数可以提升此类构件的屈曲荷载, 但也使得其屈曲模态更加复杂. 文献[5]研究了初始几何缺陷对预应力撑杆钢柱承载能力的影响. 文献[6-7]研究发现, 预应力撑杆钢柱不同阶屈曲荷载可能相当接近, 并会发生不同屈曲模态之间相互影响的相关屈曲现象. 文献[8]对设置双层撑杆的预应力撑杆钢柱相关屈曲展开了研究, 结果表明此类双层撑杆结构可忽略相关屈曲影响. 文献[9-10]对高性能钢材的单层预应力撑杆钢柱展开了研究, 发现提高钢材强度后, 预应力撑杆钢柱的稳定承载能力有所提高, 但是这项研究仅是针对沿着柱高设置一层撑杆的情形展开的, 且并未考虑撑杆长度、拉索直径和屈曲模态的影响.

本文以设置双层撑杆的预应力撑杆钢柱为研究对象, 通过有限元软件 ABAQUS 进行数值分析, 重点考察采用不同强度等级的钢材时, 预应力撑杆钢柱的稳定性能, 并分析其影响因素.

1 分析模型

图 1 为本文研究的预应力撑杆钢柱模型示意图, 其中撑杆设置在柱高三等分点位置, 柱和撑杆采用相

^① 收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808070).

作者简介: 梁 策(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构方面的研究.

通信作者: 袁 军, 副教授, 硕士研究生导师.

同的圆管截面, 其外径和壁厚分别为 38.1 mm 和 6.35 mm. 柱和撑杆采用的材料为钢材, 其弹性模量为 206 000 N/mm², 而拉索的弹性模量为 160 000 N/mm². 本文分析时柱长设置为 5 100 mm, 中心柱与撑杆的连接形式为刚接, 柱端约束形式为铰接约束, 轴心受压荷载作用于柱上端. 有限元分析时, 柱和撑杆采用梁单元模拟, 而预应力索采用桁架单元模拟.

根据撑杆长度和拉索直径的不同, 本文共选取 4 个不同的模型进行研究, 模型参数如表 1 所示. 其中, 模型 1 和模型 2 的拉索直径为 1.6 mm, 模型 3 和模型 4 的拉索直径为 8.0 mm; 模型 1 的撑杆长度为 255 mm, 模型 2 和模型 3 的撑杆长度相同均为 510 mm, 模型 4 的撑杆长度为 765 mm.

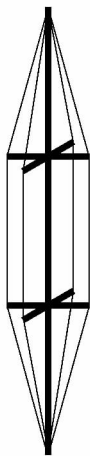


图 1 双层撑杆预应力钢柱

表 1 分析模型参数取值

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
撑杆长度 a/mm	255	510	510	765
索直径 φ_s/mm	1.6	1.6	8	8

如前所述, 本文重点研究钢材强度对预应力撑杆钢柱稳定性能的影响. 为此, 对于表 1 所示的 4 种模型, 本文对柱和撑杆均采用碳素结构钢 Q235 以及低合金高强度结构钢 Q345, Q390, Q420 和 Q460 5 种钢材进行分析, 分析时钢材采用理想弹塑性模型.

2 数值分析

2.1 线性屈曲分析

对本文研究的预应力撑杆钢柱进行线性屈曲分析表明, 这类结构构件通常会呈现出图 2 所示的对称和反对称屈曲模态. 在对称屈曲模态中, 中心柱的最大侧向挠度出现在柱跨中位置, 而在反对称屈曲模态中, 中心柱的最大侧向挠度出现在柱高三分之一(撑杆与中心柱交点)附近.

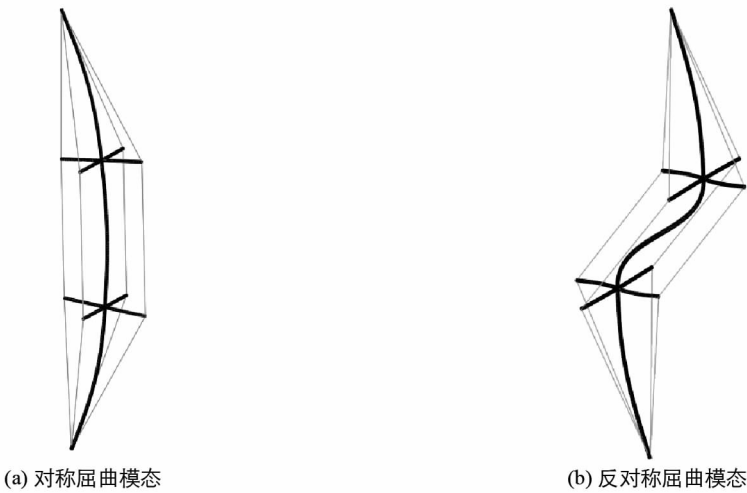


图 2 屈曲模态

表 2 列出了表 1 所示 4 种模型的屈曲模态. 其中, 模型 1 和模型 2 为对称屈曲模态, 模型 3 和模型 4 为反对称屈曲模态. 由表 1 可以看出, 模型 1 和模型 2 的撑杆长度或者拉索直径小于模型 3 和模型 4. 因此, 当撑杆长度或者拉索直径较小时, 预应力撑杆钢柱呈现出对称屈曲模态, 反之则为反对称屈曲模态.

表 2 4 种模型的屈曲模态

模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
对称屈曲	对称屈曲	反对称屈曲	反对称屈曲

2.2 非线性屈曲分析

初始缺陷是影响预应力撑杆钢柱稳定性能的一个重要因素,本文在数值分析时同样考虑了初始缺陷的影响.缺陷大小取为 $L/300$ (L 为柱长),而缺陷分布假定与其最低阶线性屈曲模态相同.除了初始缺陷以外,拉索初始预应力也是影响预应力撑杆钢柱稳定性能的另一因素,本文采用文献[8]中的方法施加初始预应力.

图 3 和图 4 所示分别为模型 1 和模型 2、模型 3 和模型 4 在采用不同强度钢材时的荷载-挠度曲线.由于屈曲模态不同,对于图 3 的模型 1 和模型 2 而言,其横轴所示的挠度表示柱中点处的挠度;而对于图 4 所示的模型 3 和模型 4 而言,其横轴所示的挠度则为中心柱柱长三等分点处的挠度.可以看出,对于模型 1 和模型 2 而言,即对称屈曲模态下,提高钢材强度并不会显著提高预应力撑杆钢柱的承载能力.然而,提高钢材强度却可以显著提高模型 3 和模型 4 的承载能力.

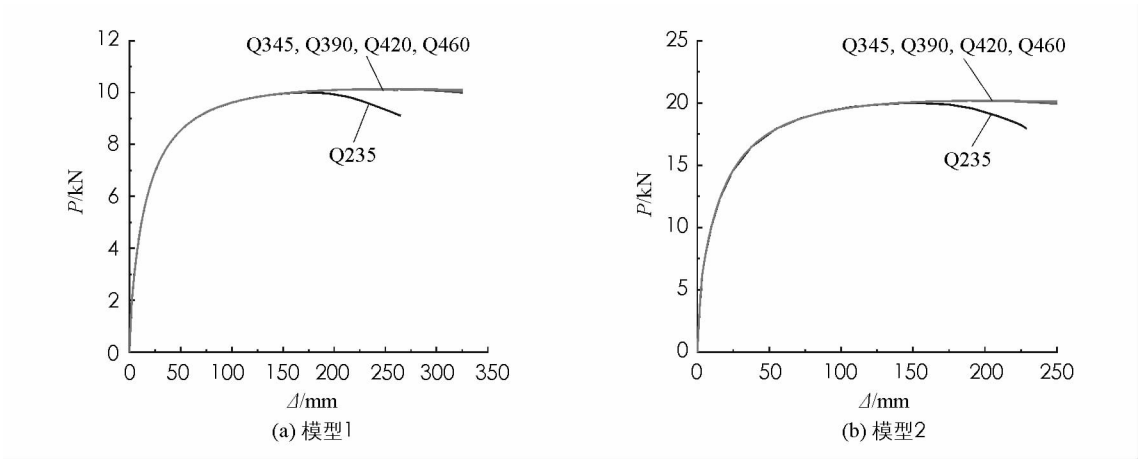


图 3 模型 1 和模型 2 的荷载-挠度曲线

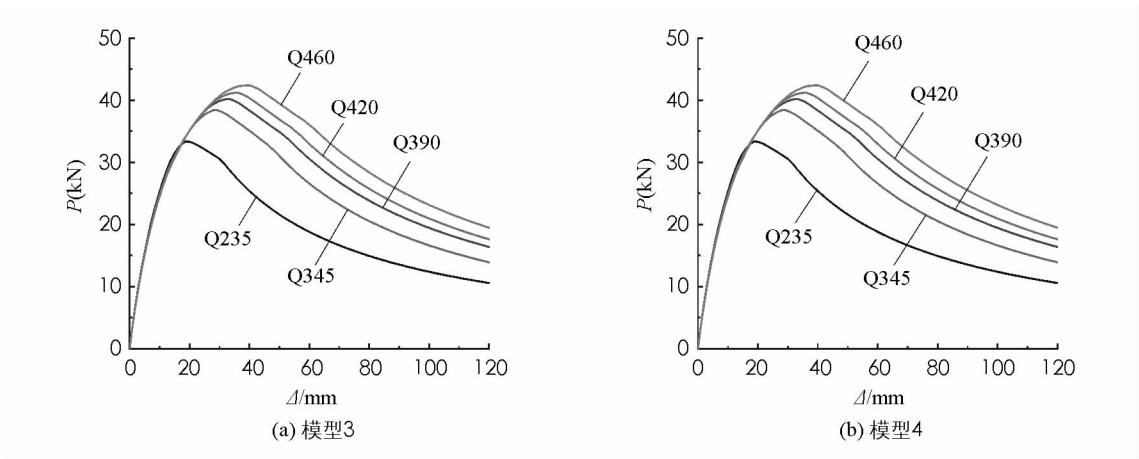


图 4 模型 3 和模型 4 的荷载-挠度曲线

表 3 所示为 4 种模型在采用不同钢材的情况下结构屈曲时的挠度.与图 3 和图 4 相同,模型 1 和模型 2 采用的是跨中挠度作为表征指标,而模型 3 和模型 4 采用的是柱高三分之一处的挠度作为表征指标.可以看出,提升钢材强度,结构屈曲时对应的挠度随之增大.同时还可以发现,对于同一种强度的钢材而言,结构发生对称屈曲时的挠度远大于发生反对称屈曲时的挠度.

	表 3 结构屈曲时的挠度					mm
	Q235	Q345	Q390	Q420	Q460	
模型 1	170.404	233.457	249.339	260.435	260.435	
模型 2	157.918	190.095	194.666	194.666	194.666	
模型 3	18.811	28.714	33.241	36.083	39.619	
模型 4	21.297	29.817	36.417	39.436	42.426	

与图 3 和图 4 类似, 图 5 和图 6 还给出了预应力撑杆钢柱的荷载-压缩曲线, 其中横坐标所示的压缩为中心柱的轴向压缩. 由图 5(a)和图 5(b)可以看出, 模型 2 的承载能力总是高于模型 1 的承载能力, 因此当结构发生对称屈曲时, 增加撑杆长度可以提升预应力撑杆钢柱的承载能力. 由图 6 可以看出, 当结构发生反对称屈曲时, 撑杆长度的增加并不能明显提升预应力撑杆钢柱的承载能力. 比较图 5(b)和图 6(a)可以发现, 当撑杆长度不变增大拉索直径后, 结构的承载能力显著提升.

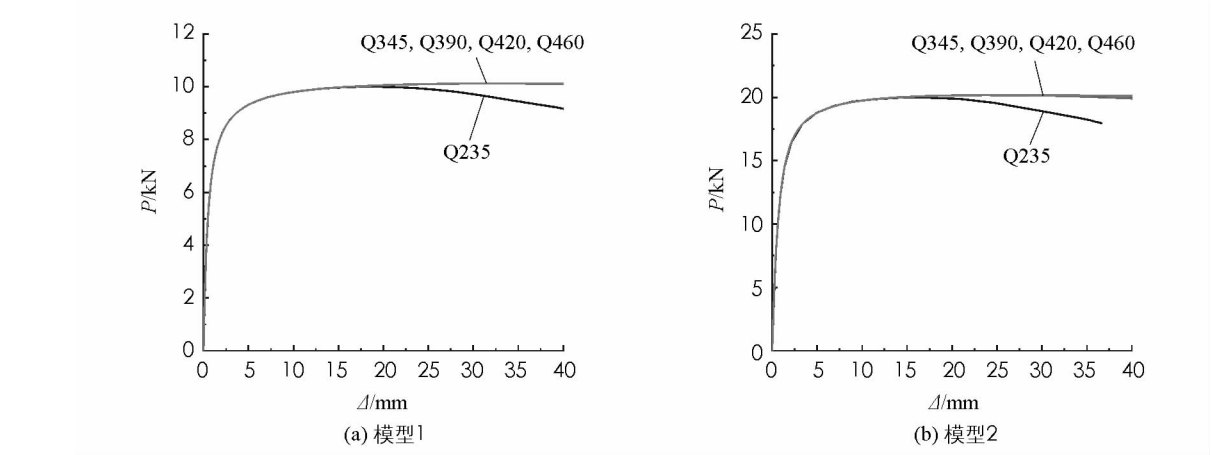


图 5 模型 1 和模型 2 的荷载-压缩曲线

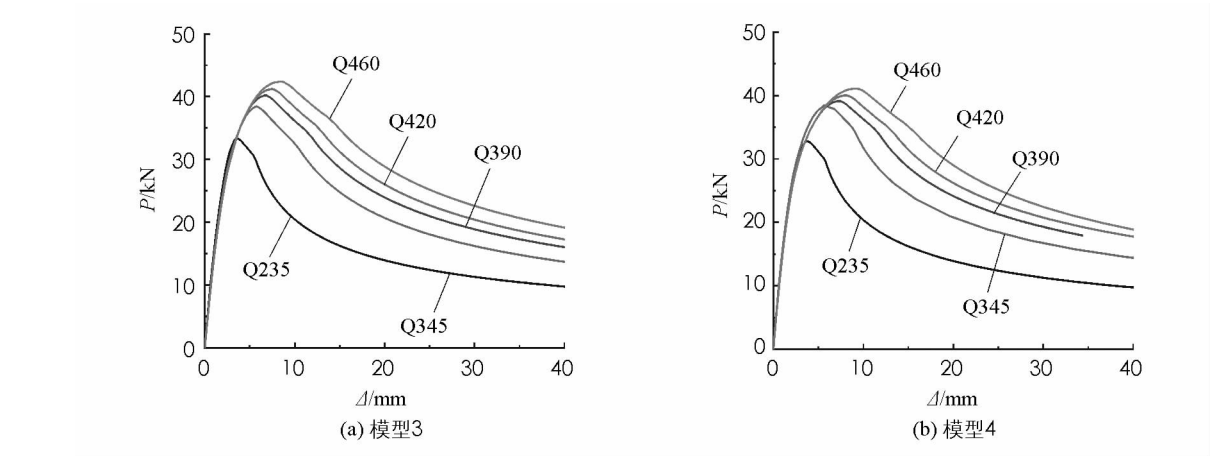


图 6 模型 3 和模型 4 的荷载-压缩曲线

为了进一步分析钢材强度对预应力撑杆钢柱承载能力的提升作用, 图 7 给出了承载能力提升率随钢材强度的变化关系. 图 7 纵轴所示的承载能力提升率 α , 表征某一强度钢材相对于 Q235 钢对应承载能力的提升率. 可由式(1)计算:

$$\alpha = \frac{P_u - P_0}{P_0} \times 100\%$$

(1)

式中, P_u 表示某种钢材强度的预应力撑杆柱的承载能力, P_0 表示 Q235 钢材预应力撑杆柱的承载能力. 可以看出, 模型 1 和模型 2 对应的承载能力提升率不超过 2%, 而模型 3 和模型 4 对应的承载能力提升率最大则可以达到 25% 以上. 因此, 当结构为反对称屈曲时, 提升钢材强度可以明显提高其承载能力; 而

当结构呈现出对称屈曲时，这种提升作用却不明显。

表 4 所示为预应力撑杆钢柱发生屈曲时的轴向压缩量。显然，模型 1 和模型 2 在发生屈曲时的轴向压缩大于模型 3 和模型 4。比较表 4 和表 3 还可以看出，预应力撑杆钢柱发生屈曲时的侧向挠度远大于其轴向压缩，即这类结构构件发生屈曲时的变形是以弯曲变形为主。

在上述分析中，初始缺陷大小取值为 $L/300$ ，然而已有研究表明^[5]，预应力撑杆柱的承载能力受初始缺陷影响较大。为此，图 8 选取了模型 1 和模型 3，研究初始缺陷对不同钢材强度下结构承载能力的影响。缺陷大小取值分别为 $L/100, L/300, L/500, L/1\,000, L/5\,000$ 。图中可以看出，随着初始缺陷的减小，结构承载能力显著增强，且模型 3 承载能力的提升程度远大于模型 1，即模型 3 对初始缺陷更为敏感。

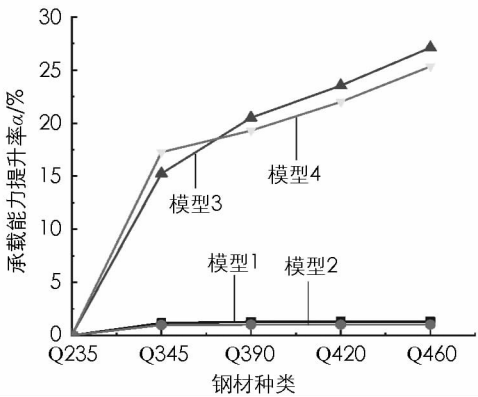


图 7 钢材强度对结构承载性能的提升

表 4 结构屈曲时的轴向压缩量 mm

	Q235	Q345	Q390	Q420	Q460
模型 1	18.273	32.390	36.583	39.669	39.669
模型 2	17.34	23.949	24.986	24.986	24.986
模型 3	3.505	5.756	6.838	7.565	8.521
模型 4	3.819	5.637	7.421	8.232	9.082

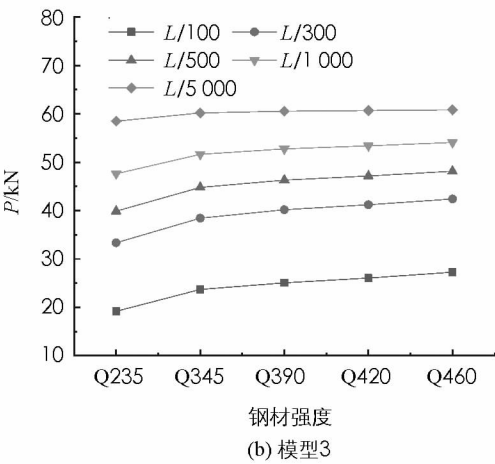
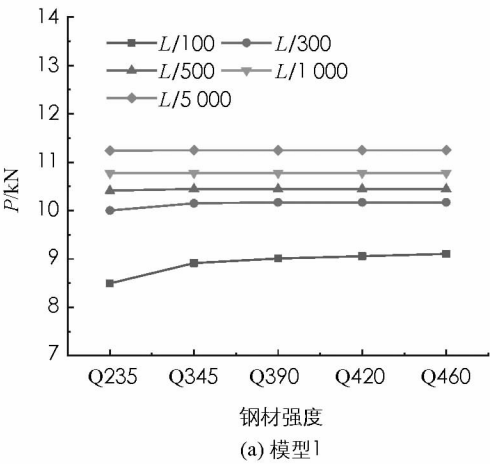


图 8 模型 1 和模型 3 的缺陷敏感性

3 结 论

- 1) 结构的屈曲模态决定了钢材强度与结构承载性能之间的关系，当结构发生对称屈曲时，提升钢材强度对结构稳定承载力并没有显著影响；当结构发生反对称屈曲时，钢材强度的提升使得结构承载性能明显增强。
- 2) 不同的撑杆长度和拉索直径，可能对结构的屈曲模态和承载性能产生显著影响。当撑杆长度或者拉索直径较小时，预应力撑杆钢柱呈现出对称屈曲模态，反之则为反对称屈曲模态；增大拉索直径，或当结构发生对称屈曲时增加撑杆长度，均可以有效地提升结构的承载性能。

参考文献:

[1] 张福星. 预应力撑杆柱索撑节点数值模拟和试验研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.

[2] MITH R J, ELLIS J S, MCCAFFREY G T. Buckling of a Single-Crossarm Stayed Column [J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(1): 249-268.

[3] HAFEZ H H, TEMPLE M C, ELLIS J S. Pre-Tensioning of Single-Crossarm Stayed Columns [J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(2): 359-375.

[4] TEMPLE M C. Buckling of Stayed Columns [J]. Journal of the Structural Division, 1977, 103(4): 839-851.

[5] DOU C, PI Y L. Effects of Geometric Imperfections on Flexural Buckling Resistance of Laterally Braced Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(9): 04016048.

[6] WADEE M A, GARDNER L, HUNT T A. Buckling Mode Interaction in Prestressed Stayed Columns [J]. Proceedings of the ICE-Structures and Buildings, 2013, 166(8): 403-412.

[7] YU J L, WADEE M A. Mode Interaction in Triple-Bay Prestressed Stayed Columns [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2017, 88: 47-66.

[8] LI P C, LIANG C, YUAN J, et al. Stability of Steel Columns Stiffened by Stays and Multiple Crossarms [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 189-197.

[9] 许可冉. 高性能钢预应力梁术构件极限承载性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.

[10] 刘学春, 许可冉, 张爱林. 高性能钢预应力撑杆柱整体稳定性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 156-161.

Investigation into Effect of Steel Strength on Buckling Strength of Prestressed Stayed Steel Columns

LIANG Ce, YANG Yu-er, QIAO Ke, YUAN Jun

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The load carrying capacities of axial compressed steel columns can be significantly enhanced by introducing stays and crossarms. In this current work, ABAQUS has been adopted to analyze the stability behavior of prestressed stayed steel columns using linear and nonlinear buckling analysis. The effects of steel strength of the capacities of prestressed stayed column with different crossarm length and stay diameters have been investigated. It has been demonstrated that the effect of steel strength can be ignored when the buckling mode is symmetric, however, the load carrying capacity can be considerably improved by steel strength when the buckling mode is anti-symmetric.

Key words: compressed steel column; buckling analysis; load carrying capacity; stability behavior

责任编辑 汤振金